

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/02>**Сайко В.Г.**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

**Наритник Т.М.**

Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук

## МОДЕЛЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА БАЗІ ЛІТАЮЧОЇ МЕРЕЖІ БПЛА

Запропоновано модель системи краудсорсингового моніторингу параметрів інтегрованої інфраструктури на основі системи низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА. Дана модель ґрунтується на концепції програмно-конфігурованих мереж, яка забезпечує гнучке централізоване управління мережею, можливість програмного конфігурування, розділення рівнів управління та передачі даних, незалежність від постачальників обладнання та використання відкритих стандартів. Застосування цієї концепції передбачає розгляд БПЛА як комутаторів SDN, а кореневі супутники системи низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника, які збирають інформацію від БПЛА та керують деякими аспектами функціонування мережі, виступають у ролі контролерів SDN. Модель моніторингу дає змогу передавати статистичну інформацію, не перевантажуючи при цьому мережу та забезпечує операторам гнучкий процес збору даних із статистичною повнотою інформації для аналітичних засобів машинного навчання. Наведено алгоритми процесу обслуговування БПЛА для забезпечення підзарядки та динамічного перерозподілу Fog-пристроїв БПЛА для забезпечення хендверу при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня. Розроблені алгоритми функціонують на основі децентралізованої блокчейн-платформи управління смарт-контрактами, що забезпечує обслуговування мережі БПЛА із достатньою швидкістю і якістю вирішення термінових задач при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня, з використанням їх публічних ключів у мережі. Такий підхід підвищує безпеку функціонування мереж БПЛА.

**Ключові слова:** блокчейн, інтегровані мережі БПЛА, забезпечення підзарядки БПЛА, системи низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника.

**Постановка проблеми.** З розвитком науки і техніки безпілотні літальні апарати (БПЛА) стають все поширенішими у різних галузях народного господарства. У сфері екологічних досліджень БПЛА виконують такі функції: моніторинг та дослідження навколишнього середовища, прогноз погоди та збір метеорологічної інформації, захист диких тварин від браконьєрства, контроль популяції тварин, пошук та порятунок людей та тварин, створення карт, зокрема 3D-карт.

У сільському господарстві БПЛА вирішують завдання, пов'язані з нанесенням добрив, пестицидів тощо [1]. Традиційні методи дистанційного зондування, які передбачають розташування віддалених датчиків на вежах над полем сільськогосподарських культур (таких як тепловізійні, мульти- і гіперспектральні камери та інші), мають обмежений радіус дії через фіксоване положення, біля якого збираються дані. Інший традиційний метод дистанційного зондування базується на використанні літальних апаратів або супутників, проте їх ефективність для сільськогосподарських оцінок суттєво обмежена часовими та просторо-

вими обмеженнями, оскільки виникають значні зміни в рослинності порівняно з навколишнім середовищем. Також якість зображень, отриманих з супутників або пілотованих апаратів, часто залежить від погодних умов, тому для здійснення повторних зйомок у відповідний момент потрібні додаткові операції.

Наукоміські завдання, що виконуються безпілотними літальними апаратами (БПЛА), зменшують тривалість та, відповідно, дальність їх автономної роботи. Це призводить до необхідності додаткового перельоту до джерела енергії для підзарядки. Щоб уникнути такого перельоту, застосовуються методи підвищення дальності польоту шляхом безпосередньої передачі енергії на БПЛА.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У 2021 році компанія WiBotic представила своє рішення бездротової зарядки безпілотних літальних апаратів [2]. БПЛА, який оснащений бортовим зарядним пристроєм WiBotic OC-251, використовує це технічне рішення. У нього також входить пристрій WiBotic PowerPad (передавач TR-301), металевий корпус якого має ЖК-дисплей для сис-

темних повідомлень і світлодіодні індикатори, що показують стан системи в будь-який момент. Стандартна антена з входом для коаксіального кабелю і вбудованим портом Ethernet дозволяє зовнішнім системам контролювати і керувати передавачем за допомогою веб-API WiBotic (програмного інтерфейсу додатків) або Wibotic Commander для управління енергоспоживанням.

Проте, розробники не розголошують конкретні завдання, які можуть бути вирішені за допомогою розробленої системи бездротової передачі енергії, діапазон частот та режим роботи приймально-випрямляючих елементів. Це ускладнює оцінку ефективності та корисності даного інноваційного рішення для відповідних завдань.

Відомий спосіб передачі енергії на БПЛА використовує проводи [3]. БПЛА залежить від таких станцій, які мають потужний кабель, що не тільки забезпечує безперебійну роботу, але й передає дані, коли інші види сигналів можуть бути заблоковані. Самі станції працюють за допомогою генераторів або з мережі. Недоліком цього способу є збільшення ваги двигуна. З приростом дальності та висоти польоту, потужність двигуна повинна збільшуватись, що призводить до збільшення маси проводів, залишаючи масу БПЛА незмінною. Одним із способів зменшення потужності двигуна є використання оптоволоконного кабелю як носія енергії [4]. Проте, головним недоліком цього підходу є обмеження дальності польоту визначеною довжиною кабелю.

В [5] автори наводять алгоритм (послідовності дій), що виконується при зниженні заряду внутрішньої батареї БПЛА для міграції сервісів з одного БПЛА на інший і переміщення БПЛА в зони підзарядки внутрішньої батареї. Недоліком запропонованого рішення є те, що автори запропонували загальний алгоритм і не навели конкретні пропозиції для практичної реалізації для забезпечення енергоефективного способу міграції сервісів у мережах БПЛА з врахуванням особливостей такої передачі, зокрема не враховують адаптивність трафіку, який проявляється протягом відповідного часу функціонування у різних кластерах мережі БПЛА із врахуванням параметру електроспоживання БПЛА. Крім того, в ньому не представлено яким чином відбувається збір даних, а також оновлення відповідного програмного забезпечення. Тобто не представлено технічні аспекти яким чином повинна працювати повна інфраструктура мережі БПЛА із зворотнім зв'язком для запропонованого алгоритму, який здійснює оптимізацію роботи мережі.

**Постановка завдання.** Одним із перспективних напрямів у вирішенні даної проблеми авторами пропонується робоча гіпотеза проведення досліджень щодо інтеграції мережі БПЛА із підтримкою SDN/NFV технологій [6, 7] та низь-

коорбітальної супутникової системи зв'язку на базі розподіленого супутника [8, 9, 10] для забезпечення із достатньою швидкістю і якістю вирішення термінових задач при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня. Застосування концепції SDN в мережах БПЛА дозволить:

1. Організувати централізоване керування мережею, що не лише дозволить ефективніше використовувати ресурси, але й підвищить якість обслуговування, забезпечивши взаємодію розподілених обчислень з мікросервісною підтримкою працездатності мережі БПЛА при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня БПЛА кластерних структур.

2. Динамічно регулювати переміщення БПЛА в тривимірному просторі при виконанні цільових задач.

Для вирішення окремих завдань у рамках вищеприписаної системної задачі для підвищення ефективності управління мережею БПЛА при міграції сервісів з одного БПЛА на інший відповідного кластеру і переміщенні БПЛА в зони підзарядки внутрішньої батареї пропонується: розробити модель системи краудсорсингового моніторингу параметрів інтегрованої інфраструктури на базі системи низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА, а також набір ефективних алгоритмів процесу обслуговування БПЛА для забезпечення підзарядки та динамічного перерозподілу Fog-пристроїв БПЛА для забезпечення хендверу при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

*Модель системи краудсорсингового моніторингу параметрів інтегрованої інфраструктури на базі системи низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА*

У цій роботі запропоновано новий підхід до організації процесу інтелектуального управління мережною інфраструктурою з врахуванням особливостей її інтегрованої інфраструктури при зниженні заряду їх вбудованих батарей до певного рівня, яка базується на системі низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА (рис. 1). Даний підхід базується на концепції програмно-конфігурованих мереж і має ряд переваг, що дозволяє вирішити різноманітні задачі [11]. Особливо цікавим з погляду поставлених завдань є забезпечення гнучкого централізованого керування мережею, можливість програмного налаштування, розділення управління та передачі даних і використання відкритих стандартів. Застосування цієї концепції включає розгляд БПЛА як комутаторів SDN, а кореневі супутники низькоорбітальної

системи, які отримують інформацію від БПЛА та керують деякими аспектами функціонування мережі, виступають у ролі контролерів SDN. У подальшому розглядається загальна архітектура процесу навчання інтелектуальних алгоритмів з точки зору забезпечення ефективного збору та попередньої обробки даних.

Як показано на рис. 1, система інтелектуального управління ґрунтується на процесі моніторингу параметрів мережної інфраструктури. Моніторинг виконує дві ключові функції, необхідні для повноцінного циклу інтелектуального управління. По-перше, моніторинг забезпечує отримання даних для формування навчальних вибірок, на основі яких готуються моделі для управління параметрами мережної інфраструктури з використанням штучного інтелекту [12]. По-друге, моніторинг дозволяє перевіряти динаміку мережі при зміні її конфігурацій під час управління, що дає можливість приймати рішення щодо ефективності навчених моделей і виявляти моменти, коли дані моделей потребують оновлення.

У контексті інтегрованої інфраструктури, що базується на системі низькоорбітального супутникового зв'язку, а саме розподіленій архітектурі супутників, та мережі з безпілотних літальних апаратів, система інтелектуального управління, яка зображена на рис. 1, повинна мати наступні характеристики:

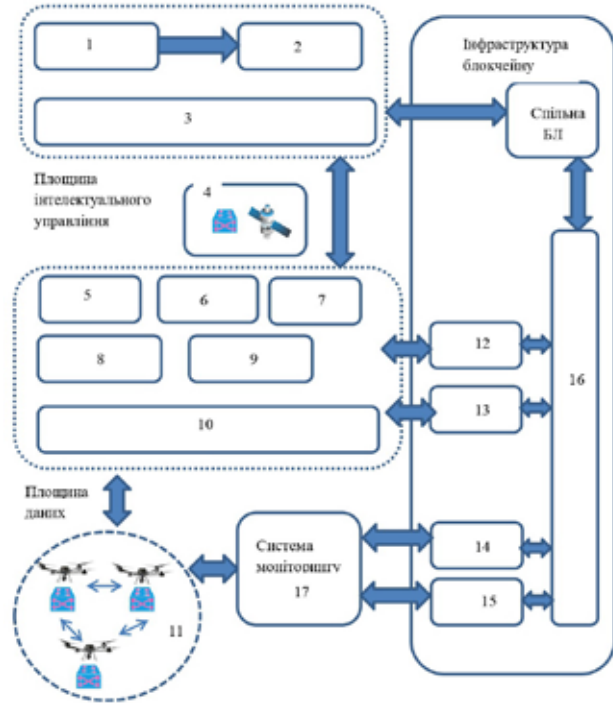
– Моніторинг мережі повинен бути загальним для всіх операторів інтегрованої мережі, з можливістю спільного використання мережевої інфраструктури та адаптивного обслуговування БПЛА будь-якого оператора.

– Моделі штучного інтелекту можуть бути особистими, власністю окремих операторів інтегрованої мережі, і використовуються для підвищення ефективності їх власних сервісів для БПЛА. Або ж вони можуть бути загальними, використовуваними для підвищення ефективності всієї мережевої інфраструктури в цілому.

– Доступ до бази даних БПЛА має бути загальним для операторів інтегрованої мережі з метою забезпечення їх ефективного обслуговування, незалежно від їх місця знаходження та поточного оператора інтегрованої мережі.

Для забезпечення вищезазначених властивостей інформаційна система управління мережною інфраструктурою повинна мати ядро, яке відповідає за основні функції управління моделями штучного інтелекту та передавання керуючої інформації до елементів мережної інфраструктури та системи моніторингу. Для інтеграції інформаційної системи та системи збору даних необхідно забезпечити ефективні механізми управління

даними, що гарантують високий рівень безпеки усіх мережних сервісів, захищеність реєстрів даних БПЛА, а також повноцінну інтеграцію усіх операторів інтегрованої мережі на основі технології блокчейн.



**Рис. 1 Загальна архітектура системи інтелектуального управління інтегрованою інфраструктурою на базі системи низькоорбітального супутникового зв'язку розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА**

- 1 – Навчання моделей штучного інтелекту.
- 2 – Верифікація моделей штучного інтелекту.
- 3 – Управління множиною інтелектуальних алгоритмів.
- 4 – Кореневий супутник з SDN контролером.
- 5 – Децентралізований синтез топологічної структури.
- 6 – Прогнозування зміни енергетичного ресурсу.
- 7 – Децентралізоване управління енергетичними ресурсами.
- 8 – Управління доступом і мобільністю при хендвері.
- 9 – Наскрізний контроль якості обслуговування.
- 10 – Управління віртуальними мережевими функціями та програмна конфігурація мережної інфраструктури.
- 11 – Кластер БПЛА площини даних.
- 12–15 – Оператори інтегрованої інфраструктури системи низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА.
- 16 – Система управління доступом до спільної бази даних на основі розподілених реєстрів блокчейн.
- 17 – Система моніторингу інтегрованої інфраструктури на базі системи низькоорбітального супутникового зв'язку на основі розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА

Для збору даних про основні параметри функціонування мережної інфраструктури використовується спеціально розроблена система краудсорсингового моніторингу. Ця система відповідає за

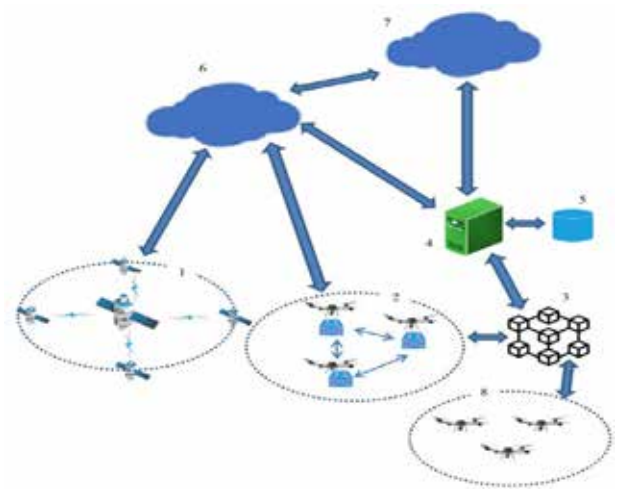
збір даних у відповідному форматі та їх передачу до відповідних баз даних. Основна відмінність цієї системи від традиційних методів, що використовуються операторами інтегрованих мереж, полягає у тому, що вона базується на кінцевих безпілотних літальних апаратах (БПЛА), які здійснюють збір даних щодо показників ефективності мережі, з фокусом на забезпеченні енергозбереження та інформації про задоволеність якістю сервісу. Такий підхід неможливо реалізувати за допомогою існуючих засобів моніторингу, передбачених у стандарті 5G, оскільки вони пропонують централізовану модель функціонування в межах одного оператора, що значно ускладнює процес узгодження результатів моніторингу між операторами з метою створення консенсусної бази даних.

Система моніторингу ґрунтується на використанні протоколу MQTT для телеметрії даних безпосередньо на пристроях БПЛА [13]. Протокол MQTT має ряд переваг, таких як простота реалізації, гарантована доставка даних та незалежність від типу інформації. У запропонованій системі всі мережеві вузли можуть виступати джерелами даних MQTT і надсилати свої параметри до MQTT брокера, розподіляючи їх за відповідними тематиками. MQTT брокер, у свою чергу, передає дані тільки тим вузлам, які безпосередньо підписані на певні тематики [13]. Ця схема дозволяє підтримувати надзвичайно великі колективи інтелектуальних літаючих апаратів і може бути використана в інтегрованій мережі. Ще однією перевагою запропонованої системи моніторингу є невеликий розмір передаваних блоків даних, що дозволяє передавати дані зі швидкістю менше 200 кбіт/с [13]. Однак, обсяг отримуваних даних в процесі роботи системи буде достатнім для формування навчальних вибірок для штучного інтелекту. Цей підхід дозволяє операторам в інтегрованій мережі гнучко налаштовувати конфігурацію системи моніторингу, вибираючи лише ті дані, які є найважливішими для поточних умов обслуговування в мережі. Іншим важливим аспектом запропонованої системи є її асинхронний характер, що дозволяє відокремити процеси моніторингу від процесів обслуговування БПЛА в інтегрованій мережі.

Зважаючи на високу вартість зберігання великих обсягів даних у розподілених реєстрах блокчейн, у системі моніторингу використовується гібридна архітектура. У цій архітектурі блокчейн використовується тільки для автентифікації БПЛА та операторів інтегрованої мережі, а також

для забезпечення функціонування алгоритму процесу обслуговування БПЛА для забезпечення підзарядки та алгоритму динамічного перерозподілу Fog-пристроїв БПЛА для забезпечення хендоверу при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня. Тоді як передавання даних моніторингу здійснюється безпосередньо до бази даних, розташованої в розподіленому туманному та хмарному середовищі (рис. 2).

Запропонована архітектура, яка показана на рис. 2, дозволяє одночасно забезпечити ефективність процесу збереження великих обсягів даних за допомогою наявних технічних рішень, а також гарантує, що доступ до системи матимуть лише ідентифіковані та довірені БПЛА або оператори інтегрованої мережі, зафіксовані в розподіленому реєстрі блокчейн.



**Рис. 2. Архітектура розробленої системи краудсорсингового моніторингу інтегрованої інфраструктури на базі системи низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА**

- 1 – Низькоорбітальна супутникова система зв'язку на базі розподіленого супутника.
- 2 – Кластер БПЛА.
- 3 – Блокчейн.
- 4 – Контролер доступу до бази даних.
- 5 – Спільна база даних.
- 6 – Інформаційно-телекомунікаційна мережа.
- 7 – Обчислювальний кластер інтегрованої мережі.
- 8 – Зона підзарядки БПЛА.

#### **Алгоритм процесу обслуговування БПЛА для забезпечення підзарядки**

Процес реалізації загального алгоритму адаптивного обслуговування БПЛА в режимі реального часу в запропонованій системі із підтримкою SDN/NFV технологій та мікросервісної архітектури низькоорбітальної супутникової системи зв'язку на базі розподіленого супутника для забезпечення із достатньою швидкістю і якістю вирішення термінових задач при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня на основі

блокчейн-платформи здійснюється наступним чином (див. рис. 2).

Крок 1. БПЛА спочатку надсилає відповідні дані на головний вузол кластеру мережі БПЛА про зниження заряду вбудованих батарей до певного рівня та запит сервісу та власні вимоги для забезпечення заряду вбудованих батарей.

Крок 2. Головний вузол кластеру мережі БПЛА надсилає запит сервісу БПЛА разом з його публічним ключем у блокчейн для перевірки смарт-контрактом.

Крок 3. Якщо інформація про БПЛА підтверджена у розподіленому реєстрі, смарт-контракт відправляє запит БПЛА кореневому супутнику інтегральній мережі.

Крок 4. Кореневий супутник інтегральної мережі аналізує запит БПЛА, визначає наявні можливості для обслуговування БПЛА, враховуючи значення енергетичних ресурсів у зонах обслуговування підзарядки БПЛА (див. рис. 1) на основі отриманих даних від децентралізованої системи моніторингу системи, а також кластер відповідних комірків підзарядки для обслуговування БПЛА і доступний обсяг інфраструктури енергетичного ресурсу та здійснюють планування ресурсів.

Крок 5. Кореневий супутник формує пропозицій SLA енергетичного кластера для БПЛА та надсилає головному вузлу кластеру мережі БПЛА.

Крок 6. Головний вузол кластеру мережі БПЛА розраховує значення функції корисності для кожного енергетичного кластера. Серед усіх пропозицій головного вузла кластеру (ГВК) мережі БПЛА, вибирає пропозиції ГВК з найвищим значенням показників інтегральної корисності.

Крок 7. БПЛА надсилає запит на реєстрацію у мережі обраного енергетичного кластера для забезпечення заряду вбудованих батарей.

Крок 8. ГВК надсилає запит на блокчейн на оренду відповідної інфраструктури та необхідного енергетичного ресурсу.

Крок 9. Кореневий супутник створює відповідні токени.

Крок 10. Проводить передачу відповідних токенів на ГВК.

Крок 11. ГВК підтверджують реєстрацію БПЛА в мережі обраного енергетичного кластера для забезпечення заряду вбудованих батарей.

Крок 12. Операція оновлення реєстрів інфраструктури та енергетичного ресурсу.

Крок 13. Операція оновлення реєстру SLA.

Крок 14. Процес функціонування системи.

Таким чином, застосування блокчейну в запропонованій інтегрованій інфраструктури на базі

системи низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА дає змогу відстежувати використання інфраструктури та енергетичного ресурсу БПЛА, а використання смарт-контрактів дає змогу заздалегідь забронювати ресурси мережної інфраструктури заряду вбудованих батарей для їх використання енергетичних кластерів у певний проміжок часу.

#### *Алгоритм динамічного перерозподілу Fog-пристроїв БПЛА*

В рамках інфраструктури архітектурних рішень передбачається динамічний перерозподіл Fog-пристроїв БПЛА наступним чином.

Крок 1. При переході з одного Fog-кластеру БПЛА в інший або при первинному підключенні, хендовері кожен Fog-пристрій БПЛА надсилає широкомовний запит з метою виявлення найближчого головного вузла кластеру мережі БПЛА.

Крок 2. Після виявлення Fog-пристроїв БПЛА надсилає дані для реєстрації у виявленій комірці Fog-кластері БПЛА.

Для реєстрації Fog-пристроїв БПЛА передає такі дані про свої обчислювальні віртуальні ресурси, виділені для передачі їх в оренду, як частина Fog-кластеру БПЛА:

- Центральний процесорний пристрій (кількість ядер та тактова частота ядра). Даний параметр на стороні сервера дозволяє розрахувати продуктивність пристрою (частини виділеної потужності виділеного віртуального простору);
- виділена кількість логічного оперативної обчислювальної пам'яті для віртуального простору;
- виділена кількість логічного постійної обчислювальної пам'яті для віртуального простору;
- Коды активних та доступних технічно бездротових технологій (наприклад, 802.11ac, 5G тощо);
- Дозволена швидкість передачі даних для сторонніх сервісів (цей параметр може бути обмежений з метою збереження якості основного зв'язку для користувача);
- Підтримувана система віртуалізації та оркестрації;
- Підтримуваний формат мікросервісів для *забезпечення із достатньою швидкістю і якістю вирішити термінові задачі при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня БПЛА кластерів мережі.*

Крок 3. Головний вузол кластеру мережі БПЛА надсилає запит сервісу БПЛА разом з його публічним ключем у блокчейн для перевірки смарт-контрактом.

Крок 4. Якщо інформація про БПЛА підтверджена у розподіленому реєстрі, смарт-контракт відправляє запит БПЛА кореневому супутнику інтегральній мережі.

Крок 5. Кореневий супутник інтегральної мережі аналізує запит БПЛА, визначає наявні можливості для обслуговування БПЛА на основі отриманих даних від децентралізованої системи моніторингу системи, а також кластер для обслуговування БПЛА і доступний обсяг інфраструктури ресурсу та здійснює планування ресурсів.

Крок 6. У разі позитивного рішення Fog-сервер кластеру БПЛА направляє повідомлення-підтвердження очікування підключення Fog-пристрою БПЛА. Fog-сервер кластеру БПЛА також передає унікальний згенерований внутрішній системний код. Цей код необхідний для подальших процесів взаємодії Fog-пристрою БПЛА зі обчислювальним кластером інтегрованої мережі, а також для системи управління міграцією мікросервісів додатків з метою однозначної ідентифікації кожного з Fog-пристроїв БПЛА у Fog-кластеру БПЛА в умовах їх фізичного переміщення. Після цього повідомлення Fog-сервер кластеру БПЛА здійснює передачу параметрів з'єднання.

Крок 7. Fog-пристрій БПЛА, що підключається, відправляє повідомлення-підтвердження Fog-серверу кластеру БПЛА про готовність.

Крок 8. ГВК надсилає запит на блокчейн на оренду відповідної інфраструктури та необхідного енергетичного ресурсу.

Крок 9. Кореневий супутник створює відповідні токени.

Крок 10. Проводить передачу відповідних tokenів на ГВК.

Крок 11. ГВК підтверджують реєстрацію БПЛА в мережі обраного кластера БПЛА для забезпечення виконання відповідної задачі.

Крок 12. Операція оновлення реєстрів інфраструктури та енергетичного ресурсу.

Крок 13. Операція оновлення реєстру SLA.

Fog-сервер отримує права на використання у своїх цілях (агрегування) обчислювальних ресурсів, наданих Fog-прироями БПЛА обчислювальних та мережових ресурсів. Варто зазначити, що кореневий супутник має отриману інформацію про всі підконтрольні Fog-кластеру БПЛА.

Крок 14. Процес функціонування системи.

#### **Подальші напрямки досліджень**

Одними із подальших напрямків наукових досліджень є:

– проведення моделювання даних алгоритмів та описаних моделей, де для моделювання була використана мова програмування Python з відповідними бібліотеками для роботи з даними, наприклад Pandas, NumPy та інші.

– розробка моделей та методів застосування систем розподіленого реєстру, які необхідні для забезпечення заданих показників якості послуг зв'язку для забезпечення хендоверу при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня, а також стабільності стану елементів такої інтегрованої інфраструктури на базі системи низькоорбітального супутникового зв'язку з архітектурою розподіленого супутника та літаючої мережі на базі БПЛА.

#### **Висновки:**

1. Запропоновано модель моніторингу інтегрованої мережі на базі літаючої мережі БПЛА, що дає змогу передавати статистичну інформацію, не перевантажуючи при цьому мережу та забезпечує операторам гнучкий процес збору даних із статистичною повнотою інформації для аналітичних засобів машинного навчання.

2. Наведено алгоритми процесу обслуговування БПЛА для забезпечення підзарядки та динамічного перерозподілу Fog-пристроїв БПЛА для забезпечення хендоверу при зниженні заряду вбудованих батарей до певного рівня.

#### **Список літератури:**

1. Зозуля О.Л., Михальська Л.М., Коваль О.Л. Цифрові технології у рослинництві: монографія. Київ: ТОВ «Сингента», 2020. 72 с.
2. Дрон на прив'язі: в Україні розробили власну інтелектуальну дотову систему живлення БПЛА. URL: [https://defence-ua.com/weapon\\_and\\_tech/dron\\_na\\_privjazi\\_v\\_ukrajini\\_rozrobili\\_vlasnu\\_intelektualnu\\_drotovu\\_sistemi\\_zhivlennja\\_bpla-3449.html](https://defence-ua.com/weapon_and_tech/dron_na_privjazi_v_ukrajini_rozrobili_vlasnu_intelektualnu_drotovu_sistemi_zhivlennja_bpla-3449.html) (Дата звернення 28.06.2023).
3. Розроблено дрони з "нескінченим" польотом: як вони допоможуть ЗСУ у бою. URL <https://focus.ua/uk/digital/573689-rozrobлено-droni-z-neskinchennim-polotom-yak-voni-dopomozhut-zsu-u-boyu-foto-video/> (Дата звернення 06.07.2023).
4. Патент WO 2013052178 A3 США: МПК G01C 3/08. An aerial platform system, and related methods.
5. Gupta, L. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. vol. 18(2). pp. 1123-1152.

6. Горбатий І.В., Бондарев А.П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи. Львів. Львівська політехніка, 2016. 336 с.
7. Заїка В.Ф., Варфоломєєва О.Г., Домрачева К.О., Гринкевич Г.О.. Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління. Київ: ДУТ, 2019. 312 с.
8. Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толюпа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія. Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
9. Патент України на корисну модель 142478 Україна. Система низькоорбітального супутникового зв'язку із міжсупутниковими каналами зв'язку терагерцового діапазону. МПК 2019.01 Н 04 В 7/185. № u201911325; заявл. 21.11.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11.
10. Saiko, V., Nakonechnyi, V., Narytnyk, T., Brailovskyi, M., Lukova-Chuiko, N. Terahertz Range Interconnecting Line for LEO-System. Proceedings – 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020. Lviv, 2020. pp. 425–429.
11. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: монографія. Київ: ПП “Золоті ворота”, 2011. 300 с.
12. Ткаченко Р.О. Нейромережеві засоби штучного інтелекту. Львів. Видавництво Львівської політехніки, 2017. 208 с.
13. Жураковський Б.Ю. Технології інтернету речей: навч. посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 271 с. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42078/1/Zhurakovskiy\\_B\\_Zeniv\\_Tehnologii\\_internet\\_recheu.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42078/1/Zhurakovskiy_B_Zeniv_Tehnologii_internet_recheu.pdf) (Дата звернення 28.06.2023).

#### **Saiko V.G., Narytnyk T.M. MODEL FOR ENSURING THE FUNCTIONING OF INTEGRATED INFRASTRUCTURE BASED ON A DRONE NETWORK**

*A model of a crowd-sourcing monitoring system for integrated infrastructure parameters based on a low Earth orbit satellite communication system with a distributed satellite architecture and a drone-based flying network has been proposed. This model is based on the concept of software-defined networks, which enables flexible centralized network management, programmable configuration, separation of control and data plane, vendor-agnostic equipment, and the use of open standards. Applying this concept considers drones as SDN switches, and the root satellites of the low Earth orbit satellite communication system with a distributed satellite architecture act as SDN controllers, collecting information from the drones and controlling certain aspects of network functioning. The monitoring model allows for transmitting statistical information without overloading the network and provides operators with a flexible data collection process, ensuring statistical completeness of information for machine learning analytics. Algorithms for the servicing process of drones are presented to facilitate recharging and dynamic redistribution of Fog devices on drones to ensure handover when the embedded batteries reach a certain level of charge depletion. These developed algorithms operate on a decentralized blockchain-based smart contract management platform, ensuring sufficient speed and quality in servicing the drone network for urgent tasks during battery depletion, using their public keys in the network. This approach also enhances the security of drone network operations.*

**Keywords:** blockchain, integrated drone networks, drone recharging, low Earth orbit satellite communication systems with distributed satellite architecture.